

# Генерация излучения разностной частоты в двухчиповом лазере

© Б.Н. Звонков, А.А. Бирюков, С.М. Некоркин, В.Я. Алёшкин\*<sup>¶</sup>, В.И. Гавриленко\*,  
А.А. Дубинов\*, К.В. Маремьянин\*, С.В. Морозов\*

Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского государственного университета,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

(Получена 12 марта 2008 г. Принята к печати 27 марта 2008 г.)

Проведено экспериментальное исследование внутрирезонаторной генерации разностной частоты в среднем ИК-диапазоне в двухчиповых полупроводниковых лазерах GaAs/InGaAs/InGaP с квантовыми ямами.

PACS: 42.55.Px, 42.65.Ky, 42.70.Nq, 78.67.De

## 1. Введение

В настоящее время во многих исследовательских центрах активно ведутся работы по созданию полупроводниковых источников в среднем и дальнем ИК-диапазонах. Наиболее значительные результаты в этом направлении достигнуты с использованием квантовых каскадных лазеров, которые генерируют излучение при комнатной температуре в непрерывном режиме в среднем ИК-диапазоне [1] и при криогенных температурах в дальнем ИК-диапазоне [2]. Однако квантовые каскадные лазеры сложны в изготовлении. Кроме того, существуют принципиальные физические ограничения, препятствующие генерации излучения в квантовых каскадных лазерах в дальнем ИК-диапазоне при комнатной температуре. Альтернативным источником излучения среднего и дальнего ИК-диапазонов может быть двухчастотный лазер, в котором за счет нелинейных процессов смещения лазерных мод происходит генерация моды разностной частоты. Внутрирезонансная генерация излучения разностной частоты в дальнем ИК-диапазоне ранее была продемонстрирована в квантовых каскадных лазерах [3].

Перспективным направлением представляется генерация излучения разностной частоты в двухчастотных полупроводниковых инжекционных лазерах ближнего ИК-диапазона, поскольку они сравнительно просты в изготовлении и работают при комнатной температуре [4,5]. В настоящей работе изучена генерация излучения разностной частоты в среднем ИК-диапазоне в „двухчиповых“ полупроводниковых лазерах, которые одновременно генерируют две спектральные линии излучения в ближнем ИК-диапазоне. Принципиальная возможность такой генерации недавно продемонстрирована в работе [6].

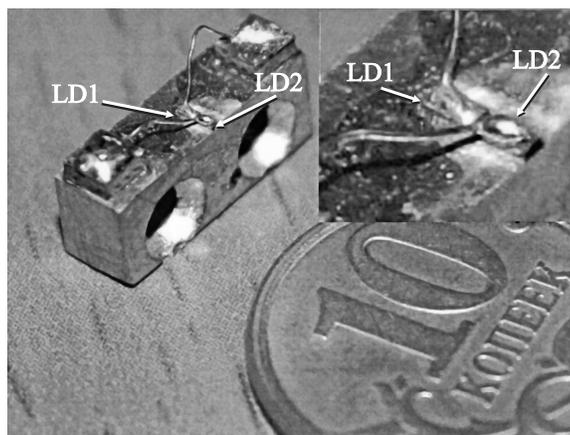
## 2. Двухчиповые лазеры

Для эффективной генерации излучения разностной частоты важны четыре фактора. Первый фактор — до-

статочно большая мощность коротковолнового (в ближнем ИК-диапазоне) лазерного излучения, служащего накачкой. Максимальные мощности излучения полупроводниковых лазеров получены в спектральной области около 1 мкм на структурах на основе GaAs. Поэтому в настоящей работе использовались полупроводниковые лазеры, работающие в этом диапазоне на гетероструктурах GaAs/InGaAs/InGaP. Вторым фактором — большая нелинейность материала лазерного волновода. Коэффициент оптической нелинейности 2-го порядка в GaAs составляет  $1.34 \cdot 10^{-10}$  м/В, что в несколько раз больше, чем в широко используемом нелинейном кристалле ниобата лития LiNbO<sub>3</sub>. Третьим фактором — выполнение условия фазового синхронизма для генерации разностной частоты. Из-за нормальной дисперсии показателя преломления GaAs фазовая скорость волны нелинейной поляризации для фундаментальных мод с длинами волн вблизи 1 мкм, как правило, оказывается меньше фазовой скорости разностной моды диэлектрического волновода. Однако условие фазового синхронизма можно выполнить, если увеличить скорость волны нелинейной поляризации путем использования для накачки поперечных мод разного порядка [5–7]. Для выполнения этого условия в настоящей работе использовалась первая поперечная мода лазерного резонатора для коротковолновой линии излучения в ближнем ИК-диапазоне и основная мода для другой (более длинноволновой) линии излучения. И наконец, четвертым фактором — это небольшие потери для излучения на разностной частоте. Для их уменьшения была использована слабо легированная подложка для лазерного чипа, в котором происходила генерация разностной моды.

Для обеспечения одновременной генерации двухчастотного излучения в области длин волн 1 мкм использовалась двухчиповая конструкция лазера [8], фотография которой приведена на рис. 1. В такой конструкции можно независимо управлять мощностью каждой из двух мод изменением соответствующего тока. Кроме того, расположение чипов структурой вниз на общем теплоотводе упрощает состыковку волноводов и позволяет заводить значительную часть излучения одного чипа в волновод другого чипа [8]. Лазерные структуры

<sup>¶</sup> E-mail: aleshkin@ipm.sci-nnov.ru



**Рис. 1.** Фотография двухчипового лазера. Стрелками указаны лазерные чипы: LD1 — длинноволновый лазерный чип, LD2 — коротковолновый лазерный чип. В верхнем углу приведено увеличенное изображение двухчипового лазера.

выращены МOCVD-эпитаксией на GaAs-подложках. Активными областями служили квантовые ямы  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  толщиной 10 нм. Изменение разностной частоты достигалось путем изменения доли In в чипе, генерирующем излучение с большей длиной волны в ближнем ИК-диапазоне ( $\lambda_1$ ). Для генерации этого излучения в настоящей работе использовались чипы из трех различных структур с различным содержанием индия в квантовых ямах  $x = 0.35$  ( $\lambda_1 = 1.130$  мкм),  $x = 0.32$  ( $\lambda_1 = 1.107$  мкм) и  $x = 0.29$  ( $\lambda_1 = 1.077$  мкм). Для генерации излучения с наименьшей длиной волны  $\lambda_2 = 0.990$  мкм использовались чипы из одной структуры ( $x = 0.2$ ). В качестве ограничительных волноводных слоев использовался твердый раствор InGaP, согласованный по постоянной решетки с GaAs.

Волноводы чипов, генерирующих основную моду на длине волны  $\lambda_1$ , имели стандартную конструкцию [9]. Грани, обращенные к другому чипу, имели просветляющее покрытие. Противоположные грани чипов имели отражающее покрытие. Для обеспечения эффективной генерации моды 1-го порядка на длине волны  $\lambda_2$  в соответствующем чипе была использована специальная конструкция волновода [10] с дополнительным слоем InGaP. Этот слой обеспечивал значительное преимущество для генерации  $\text{TE}_1$ -моды по отношению к генерации  $\text{TE}_0$ -моды. Просветляющее и отражающее покрытия не использовались в данном чипе.

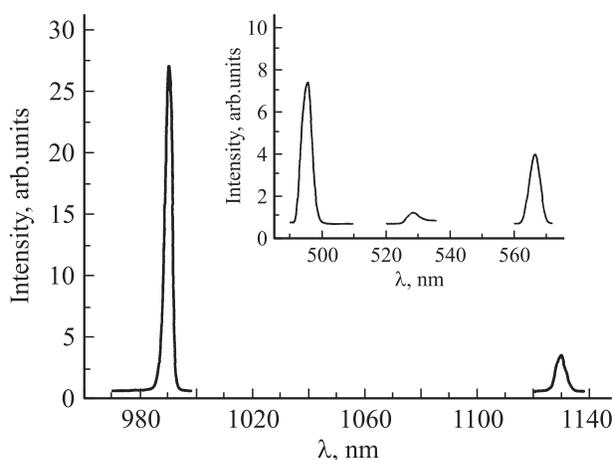
Эффективная генерация излучения разностной частоты осуществлялась в чипе, излучающем на длине волны  $\lambda_2$ , поскольку более длинноволновое излучение с длиной волны  $\lambda_1$  в нем не поглощается. Для уменьшения потерь на разностной частоте для данного чипа была использована подложка GaAs с невысокой концентрацией электронов  $n \approx 10^{17} \text{ см}^{-3}$ , которая служила волноводом для излучения среднего ИК-диапазона на разностной частоте.

### 3. Экспериментальные результаты и обсуждение

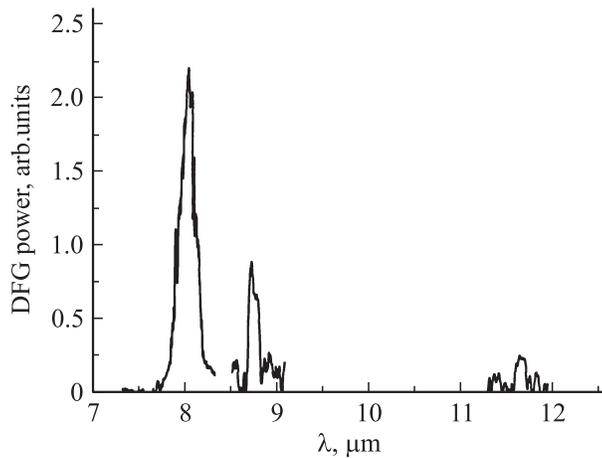
Наблюдения спектров излучения в ближнем и среднем ИК-, а также видимом диапазоне (вторые гармоники и излучение на суммарной частоте) проводились с внешнего скола чипа, генерирующего излучения с длиной волны  $\lambda_2$  (LD2 на рис. 1) при комнатной температуре. Измерения на суммарной частоте проводились для контроля эффективности нелинейного взаимодействия мод в лазере. Спектры лазерного излучения в ближнем ИК- и видимом диапазонах исследовались с помощью дифракционного решеточного монохроматора МДР-23.

На рис. 2 приведен измеренный спектр излучения, генерируемого одним из двухчиповых лазеров в ближнем ИК-диапазоне при токах накачки каждого чипа около 1 А. На вставке рис. 2 представлен спектр излучения в видимом диапазоне, в котором две крайние линии соответствуют излучению на удвоенных частотах двух лазерных чипов, а центральная линия — излучению на суммарной частоте. Значительная интенсивность излучения на суммарной частоте свидетельствует об эффективности нелинейных процессов.

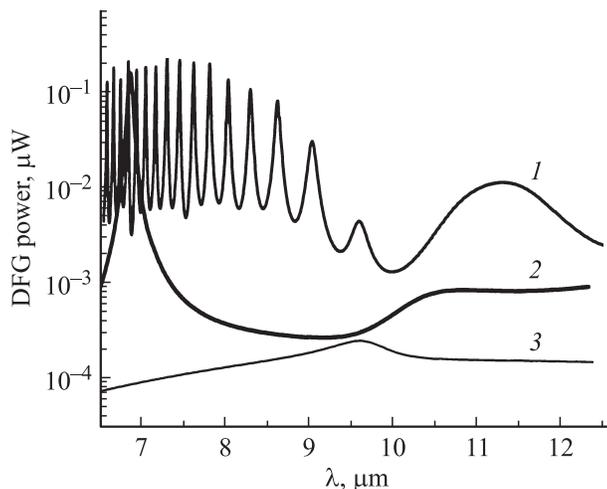
Спектральные измерения в среднем ИК-диапазоне проводились также на монохроматоре МДР-23. Для этой цели штатная дифракционная решетка монохроматора заменялась решеткой с числом штрихов 75 на миллиметр от монохроматора ИКС-25М (область преимущественной концентрации энергии свыше 40% от максимума в 1-м порядке в области длин волн 4000–16 000 нм). Калибровка спектрометра с такой решеткой осуществлялась по высшим порядкам дифракции гелий–неонового лазера с длиной волны 0.63 мкм. Излучение на разностной частоте в среднем ИК-диапазоне детектировалось широкополосным фотоприемником CdHgTe (полоса чувствительности 2–12.5 мкм), охлаждаемым жидким азотом ( $T = 77$  К). При этом излучение ближнего ИК-диапазона отсекалось с помощью фильтра из чи-



**Рис. 2.** Типичный спектр лазерной генерации двухчипового лазера. На вставке — спектр генерации удвоенных и суммарной частот.



**Рис. 3.** Спектры генерации разностной частоты для двухчиповых лазеров. Спектр с максимумом излучения около 8 мкм получен в лазере с линиями генерации в ближнем ИК-диапазоне  $\lambda_1 = 1.130$  и  $\lambda_2 = 0.990$  мкм, спектр с максимумом около 8.75 мкм —  $\lambda_1 = 1.107$  и  $\lambda_2 = 0.990$  мкм, спектр с максимумом около 11.65 мкм —  $\lambda_1 = 1.077$  и  $\lambda_2 = 0.990$  мкм.



**Рис. 4.** Рассчитанная зависимость мощности генерации разностной частоты от длины волны для трех структур лазера, генерирующего  $TE_1$ -моду. Линия 1 соответствует структуре с концентрацией электронов в подложке  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ , линии 2 и 3 —  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Структура, соответствующая линии 2, имеет на подложке буферный слой толщиной 3 мкм с концентрацией электронов  $10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Мощность коротковолновых мод полагалась равной по 1 Вт.

стого Ge. Все измерения проводились при модуляции тока накачки лазеров меандром с частотой повторения 1 кГц (длительность импульса тока 500 мкс). На рис. 3 приведены измеренные спектры излучения в среднем ИК-диапазоне. Положение обнаруженных спектральных линий соответствует рассчитанным разностным частотам. Оценка интегральной мощности линии излучения разностной частоты с максимумом около 8 мкм, сделанная путем сравнения с излучением черного тела,

дает значение порядка 0.1 мкВт, что хорошо согласуется с результатами расчета (рис. 4). Мощность остальных линий была заметно меньшей. Отметим, что в работе [6] наблюдалось излучение разностной частоты только с длиной волны около 8 мкм. При выключении любого из лазерных чипов линия излучения на разностной частоте исчезает.

На рис. 4 представлены результаты теоретического расчета мощности генерации излучения на разностной частоте в наших структурах. Детали расчета можно найти в работе [11]. При расчете полагалось, что ширина лазерных линий в ближнем ИК-диапазоне является бесконечно малой, а изменение разностной частоты достигается за счет изменения длины волны  $\lambda_1$  ( $\lambda_2 = 0.990$  мкм). Мощности излучения обеих коротковолновых мод полагались равными по 1 Вт. Толщина подложки полагалась равной 160 мкм, а концентрация электронов в ней —  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (линия 1), что соответствует структуре, в которой происходит генерация разностной частоты. Для сравнения были проведены расчеты для структур с концентрацией электронов в подложке  $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (линии 2 и 3), которые часто используются для изготовления лазерных диодов. Разница между структурами, соответствующими линиям 2 и 3, состоит в том, что в первом случае (линия 2) присутствует 3 мкм буферный слой GaAs с концентрацией электронов  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  между подложкой и лазерной структурой, а во втором случае (линия 3) он отсутствует. Из рисунка хорошо видны две особенности. Первая состоит в том, что увеличение концентрации электронов в подложке с  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{18}$  без введения буферного слоя уменьшает мощность генерации на 2–3 порядка. Это следствие увеличения потерь на свободных носителях для волны с разностной частотой. Введение буферного слоя позволяет увеличить мощность излучения в районе длин волн 7 мкм, поскольку уменьшает поглощение поверхностной волны (поверхностного плазмона) в этом диапазоне, которая существует на границе металла и полупроводника.

Вторая особенность состоит в том, что в структурах с сильным легированием подложки имеется один (в структуре без буферного слоя) или два (в структуре с буферным слоем) широких максимума, тогда как в структуре с небольшим легированием имеется много узких пиков на зависимостях мощности от длины волны. Слабо легированная подложка, вносящая малые потери, служит сверхразмерным волноводом для излучения с разностной частотой, поэтому в ней имеется много мод с малым затуханием. Максимумы на зависимости мощности от длины волны в этом случае соответствуют ситуации, когда выполняется условие фазового синхронизма для какой-либо моды. В структурах на сильно легированной подложке существует одна или несколько мод поверхностных плазмонов, которые и возбуждаются волной поляризации на разностной частоте. Коэффициент поглощения для таких мод существенно больше, чем для мод сверхразмерного волновода, а коэффициент перекрытия с волной поляризации существенно выше,

чем для моды, распространяющейся по всей толщине подложки. Последнее обстоятельство объясняет, почему в области длин волн 7 мкм мощности кривых 1 и 2 примерно одинаковы. Из рис. 4 видно, что структура со слабо легированной подложкой является предпочтительной для генерации излучения на разностной частоте в широком спектральном диапазоне, поэтому именно она была использована в эксперименте.

Отметим, что полуширина экспериментально измеренного спектра генерации с максимумом около 8 мкм (рис. 3) примерно вдвое превосходит полуширину соответствующего пика на рис. 4. Вероятно, это происходит из-за того, что подложка не является плоскопараллельной, как это предполагалось в расчете, и поэтому последний может рассматриваться лишь как качественное объяснение наблюдаемых спектров. Отклонение от плоскопараллельности подложки должно привести к уширению пиков на линии 1 и уменьшению их амплитуды. Если вычислить полуширину спектра генерации на разностной частоте, учитывая ширину линий в ближнем ИК-диапазоне, в предположении, что условие фазового синхронизма выполняется для любых частот, то получается величина, примерно на 30% большая наблюдаемой. Поэтому можно сделать вывод, что ширина линии спектра определяется волноводными свойствами подложки.

#### 4. Заключение

В данной работе экспериментально исследована генерация излучения на разностной частоте в среднем ИК-диапазоне ( $\lambda = 8-12$  мкм) в двухчиповом полупроводниковом лазере с квантовыми ямами при комнатной температуре. При мощности генерации в ближнем ИК-диапазоне около 1 Вт мощность излучения на разностной частоте составила 0.1 мВт. Согласно проведенным расчетам, ширина линии излучения на разностной частоте определяется волноводными свойствами подложки лазерного чипа, в котором она осуществляется.

Работа была выполнена при поддержке RFBR (гранты № 08-02-90054-Бел, № 07-02-00486, 07-02-12177-офи, 08-02-97034-р\_поволжье), президиума РАН (программа „Электромагнитные волны терагерцового диапазона“), программы РАН „Когерентное оптическое излучение полупроводниковых соединений и структур“, президента РФ (МК-3344.2007.2), госконтракта Министерства образования и науки № 02.518.11.7031.

#### Список литературы

- [1] S. Blaser, D.A. Yarekha, L. Hvozdar, Ya. Bonetti, A. Muller, M. Giovannini, J. Faist. *Appl. Phys. Lett.*, **86**, 041 109 (2005).
- [2] R. Kohler, A. Tredicucci, F. Beltram, H.E. Beere, E.H. Linfield, A.G. Davies, D.A. Ritchie, R.C. Iotti, F. Rossi. *Nature*, **417**, 156 (2002).

- [3] M.A. Belkin, F. Capasso, A. Belyanin, D.L. Sivco, A.Y. Cho, D.C. Oalkey, C.J. Vineis, G.W. Turner. *Nature Photon.*, **1**, 288 (2007).
- [4] A. Belyanin, F. Capasso, V.V. Kocharovskiy, V.I. Kocharovskiy, M.O. Scully. *Phys. Rev. A*, **63**, 53 803 (2001).
- [5] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, Н.Б. Звонков. *ФТП*, **35**, 1256 (2001).
- [6] B.N. Zvonkov, A.A. Biryukov, A.V. Ershov, S.M. Nekorkin, V.Ya. Aleshkin, V.I. Gavrilenko, A.A. Dubinov, K.V. Maremyanin, S.V. Morozov, A.A. Belyanin, V.V. Kocharovskiy, V.I. Kocharovskiy. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 021 122 (2008).
- [7] M. Jager, G.I. Stegeman, M.C. Flipse, M. Diemeer, G. Mohlmann. *Appl. Phys. Lett.*, **69**, 4139 (1996).
- [8] A.A. Biryukov, V.Ya. Aleshkin, S.M. Nekorkin, V.V. Kocharovskiy, V.I. Kocharovskiy, B.N. Zvonkov, M.O. Scully. *J. Mod. Optics*, **52**, 2323 (2005).
- [9] И.А. Авруцкий, Л.М. Батукова, Е.М. Дианов, Б.Н. Звонков, Н.Б. Звонков, Г.А. Максимов, И.Г. Малкина, Л.В. Медведева, Т.Н. Янькова. *Квант. электрон.*, **21**, 921 (1994).
- [10] А.А. Бирюков, Б.Н. Звонков, С.М. Некоркин, В.Я. Алешкин, А.А. Дубинов, В.В. Кочаровский, В.В. Кочаровский. *ФТП*, **42**, 361 (2008).
- [11] В.Я. Алешкин, А.А. Афоненко, А.А. Дубинов. *ЖТФ*, **76** (9), 98 (2006).

Редактор Л.В. Беляков

#### Difference-frequency generation in butt-join diode laser

*B.N. Zvonkov, A.A. Biryukov, S.M. Nekorkin, V.Ya. Aleshkin\*, V.I. Gavrilenko\*, A.A. Dubinov\*, K.V. Maremyanin\*, S.V. Morozov\**

Physical-Technical Institute  
of Nizhny Novgorod State University,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia  
\* Institute for Physics of Microstructures  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

**Abstract** The intracavity difference-frequency generation in middle infrared region have been experimentally investigated in the butt-join diode lasers based of GaAs/InGaAs/InGaP with quantum wells.